

## К ВОПРОСУ О ЗАПАСЕ ПРОЧНОСТИ ЛЕНТОЧНЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ

*Н.В. Хозяйкина, В.А. Чередник, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

*И.Н. Попович, Акционерное общество «Институт инновационных технологий в энергетике и энергосбережении», Украина*

Представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния ленточных предохранительных целиков. Установлены закономерности деформирования охранных конструкций в горногеологических условиях глубоких угольных шахт. Определена оптимальная ширина предохранительных целиков, при которой достигается допустимый уровень деформирования охраняемой подготовительной выработки, позволяющей ее повторное использование.

Основным назначением предохранительных целиков на сопряжении штреков с лавой является предотвращение чрезмерных деформаций подготовительной выработки для сохранения ее функционального назначения и проветривания. Целик может быть угольным или возведенным из каких либо материалов: круглый лес, шпалы, твердеющие материалы типа «текхард». Эта конструкция вытянута вдоль выработки, поэтому такие целики получили название ленточных.

Расчету ленточных целиков, посвящено огромное количество работ. Практически все они основаны на решении аналитических задач, расчетные схемы которых идеализированы в силу ограниченных возможностей методов исследований. В этом отношении более гибким и универсальным инструментом являются численные методы.

Целью исследований напряженно-деформированного состояния ленточных предохранительных целиков является установление закономерностей деформирования охранных конструкций в горногеологических условиях глубоких угольных шахт и определения такой их ширины, при которой достигается допустимый уровень деформирования охраняемой подготовительной выработки, позволяющей ее повторное использование.

На рис. 1 показано поперечное сечение 9-го конвейерного штрека 9-й восточной лавы пласта  $h_8$  шахты «Комсомольская» в месте его сопряжения с лавой.

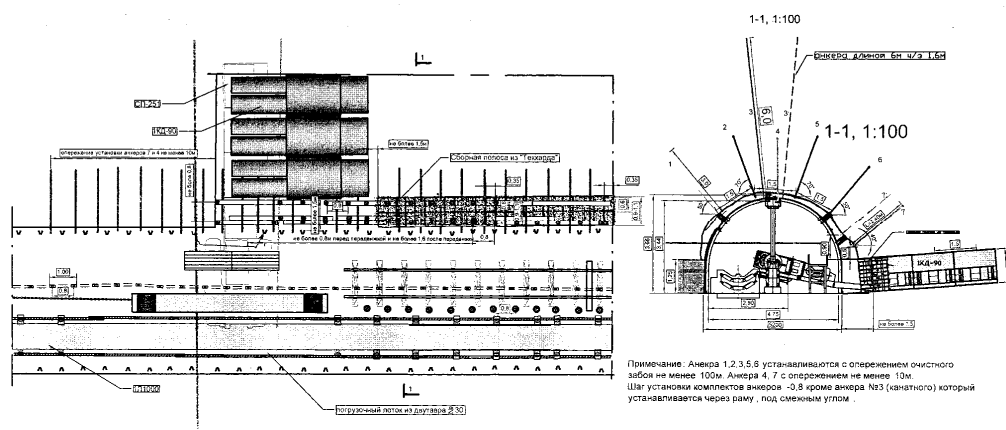


Рис. 1. Поперечное сечение 9-го конвейерного штрека 9-й восточной лавы пласта  $h_8$

Крепь выработки – рамно-анкерная. Поддерживающая податливая крепь из спецпрофиля СВП-27, двухуровневая анкерная система по проекту ИГТМ НАН Украины содержит один канатный анкер длиной 6 м и шесть сталеполимерных анкеров длиной 2,4 м.

Решение задачи выполнено с применением программного обеспечения PHASE 2 канадской компании Rockscience. Расчетная схема с конечно-элементной сеткой к решению задачи о напряженно-деформированном состоянии ленточного целика приведена на рис. 2.

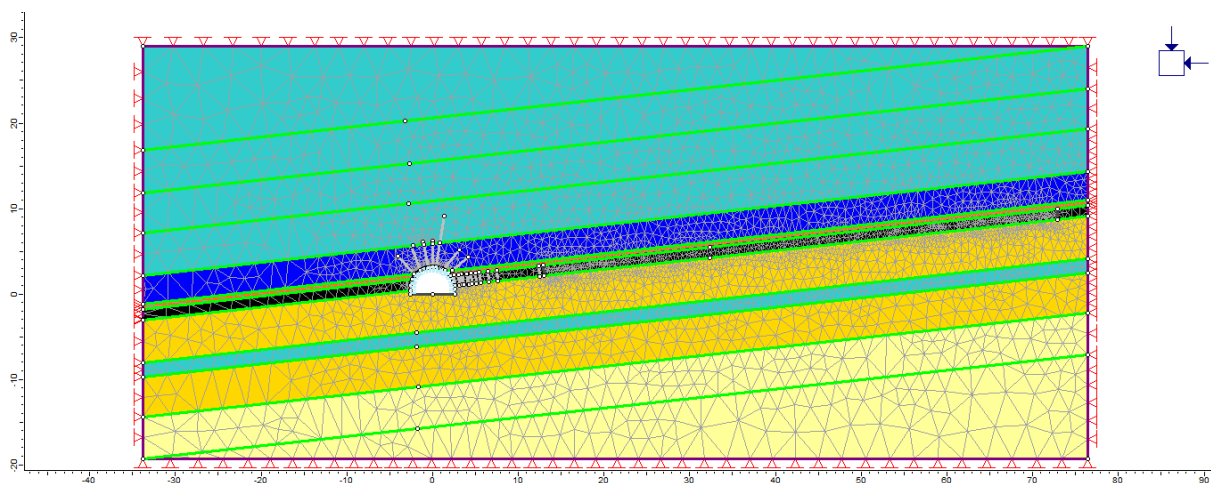


Рис. 2. Расчетная схема и конечно-элементная сетка к решению задачи о напряженно-деформированном состоянии ленточного целика

Задача решается в двумерной постановке. Учитывая небольшой угол наклона пласта (до 10 градусов), в расчётной схеме рассматривается горизонтальное залегание горных пород, что не влияет на точность решения.

Фактическая трехмерная задача учитывается путем ведения в граничные условия дополнительного коэффициента пригрузки  $k = 1,8$ , полученного на основании методики, изложенной в работах Король А.Ю. [1] Исходные данные к решению задачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета целика

Глубина ведения горных работ, м	Объемный вес пород, т/м <sup>3</sup>	Мощность вынимаемого пласта, м	Варьируемый размер целика	Физико-механические свойства вмещающих пород			
				Наименование	Модуль Юнга, МПа	Коэффиц. Пуассона	Прочность на сжатие, МПа
1100	2,5	1,25	0,5-8m	Аргиллит	1900	0,21	80,2
				Алеврит	3200	0,21	57,0
				Песчаник	2800	0,30	150,2
				Уголь	4470	0,26	25

Оценка прочности целика осуществляется с помощью критерия Л.Я Парчевского – А.Н. Шашенко [2], который имеет следующий вид:

$$\sigma_e = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} = R_c k_c k. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_e$  - напряжение эквивалентные одноосным;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - главные напряжения,  $R_c$  - предел прочности материала целика на одноосное сжатие,  $k_c$  - коэффициент структурного ослабления.

Оценка состояния материала целика, находящегося в объемном напряженном состоянии, выполнена путем рассмотрения коэффициента запаса прочности:

$$k_3 = \frac{R_c k_c k}{\sigma_e}$$

Последовательность решения задачи такова. Исследуется наиболее вероятное в отношении разрушения центральное сечение ленточного целика  $O'-O'$  (рис. 3).

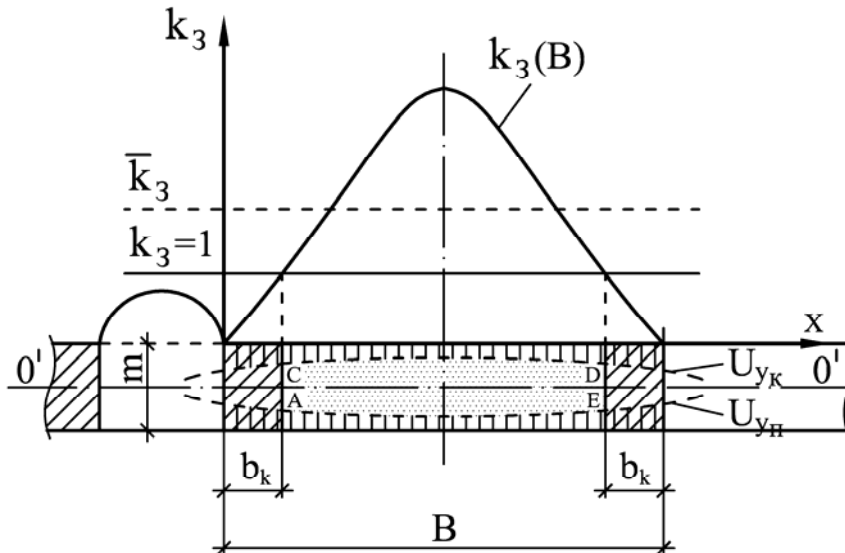


Рис. 3. Расчетная схема к оценке напряженно-деформированного состояния предохранительного целика

Слева к целику примыкает выработка, справа – выработанное пространство лавы. Распределение коэффициента запаса прочности целика вдоль этой линии  $O'-O'$  предположительно имеет вид кривой  $k_\zeta = f(B)$ .

При этом краевые части целика шириной  $b_k$  могут быть разрушены ( $k_\zeta < 1$ ). В зависимости от ширины  $B$  несущая способность целика может изменяться от нуля до некоторой величины равной  $B - 2b_k$ . Изменяя ширину целика от  $0,5m$  до  $8m$  (здесь  $m$  - мощность пласта угля), следует установить каким образом изменяется его несущая способность и напряженно-деформированное состояние прилегающих пород кровли и почвы.

Из графиков рис. 4 и 5 следует, что целики шириной  $0,5m$  и  $1m$  будут разрушены полностью ( $k_\zeta < 1$ ). Более широкие целики в центральной части сохраняют несущую способность, которая тем больше, чем шире целик.

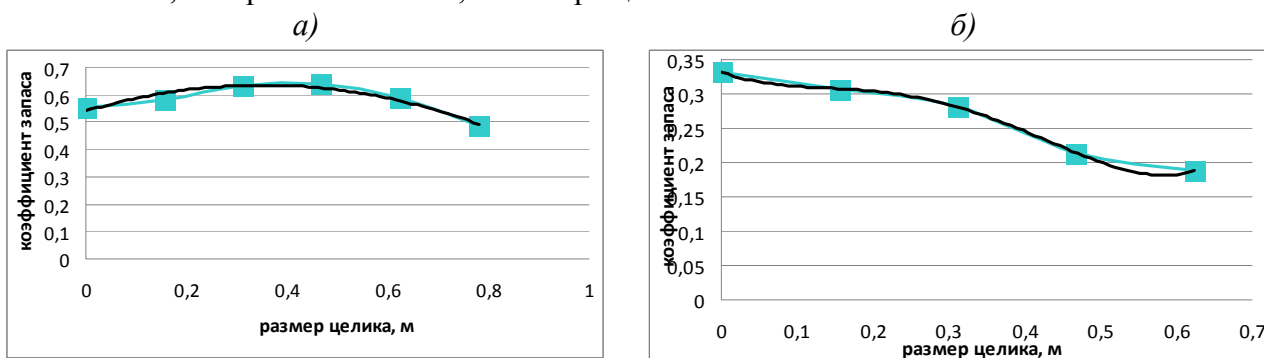


Рис. 4. Изменение коэффициента запаса прочности вдоль центральной линии целика:

а)  $\frac{B}{m} = 1$ ;

б)  $\frac{B}{m} = 0,5$

Это обстоятельство отражено на рис. 6 и 7, на которых видно, как растет неразрушенная область в центре целика по мере увеличения его ширины и, соответственно, как увеличивается его прочность.

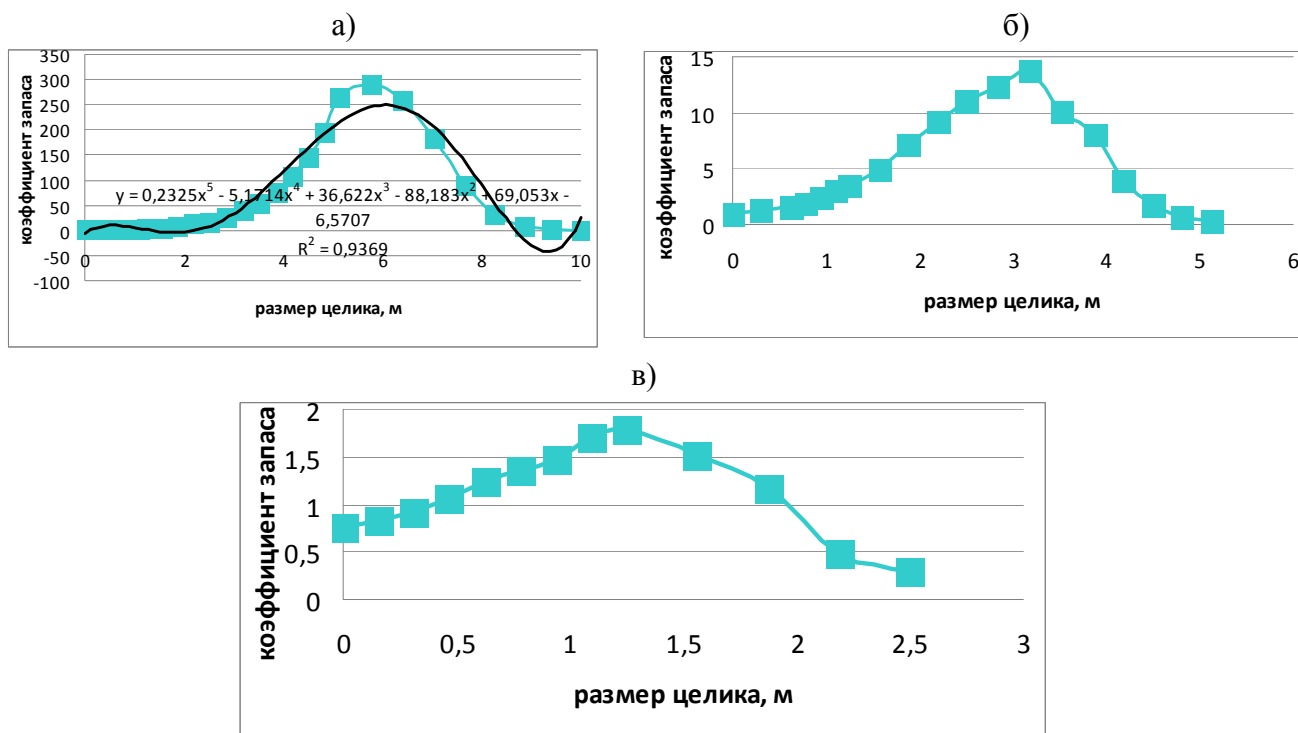


Рис. 5. Изменение коэффициента запаса прочности вдоль центральной линии целика:

а)  $\frac{B}{m} = 8$ ;      б)  $\frac{B}{m} = 4$ ;      в)  $\frac{B}{m} = 2$

Характер изменения величины коэффициента запаса прочности целика вдоль центральной линии, где вероятность разрушения является наибольшей, подчиняется полиномиальной зависимости следующего вида:

$$k_{\zeta} = k_{\zeta}(x) = ax^5 - bx^4 + cx^3 - dx^2 + ex - f, \quad (2)$$

где  $a, b, c, d, e, f$  - коэффициенты аппроксимации, величина которых зависит от ширины целика.

Зависимость (2) характеризует изменение коэффициента запаса прочности целика вдоль средней его линии от точки к точке. При этом во внимание принимается только неразрушенная (несущая) часть целика шириной  $B - 2b_k$ . Среднее же его значение можно определить, интегрируя эти величины вдоль этой линии [3-11]. Тогда величина интегрального значения коэффициента запаса прочности с учетом (3.8) определится из выражения:

$$\bar{k}_{\zeta} = \frac{1}{\hat{A} - 2\hat{a}_k} \int_{\hat{a}_k}^{\hat{A}-\hat{a}_k} k_{\zeta}(x) dx. \quad (3)$$

Величина разрушенных краевых частей определить из условия (2) следующим образом:

$$k_s = ev_k - f = 1, \quad (4)$$

исходя из того, что  $a = \hat{a} = \tilde{n} = d = 0$ .

Тогда

$$\hat{a}_k = \frac{1}{\tilde{n}}(1 + f). \quad (5)$$

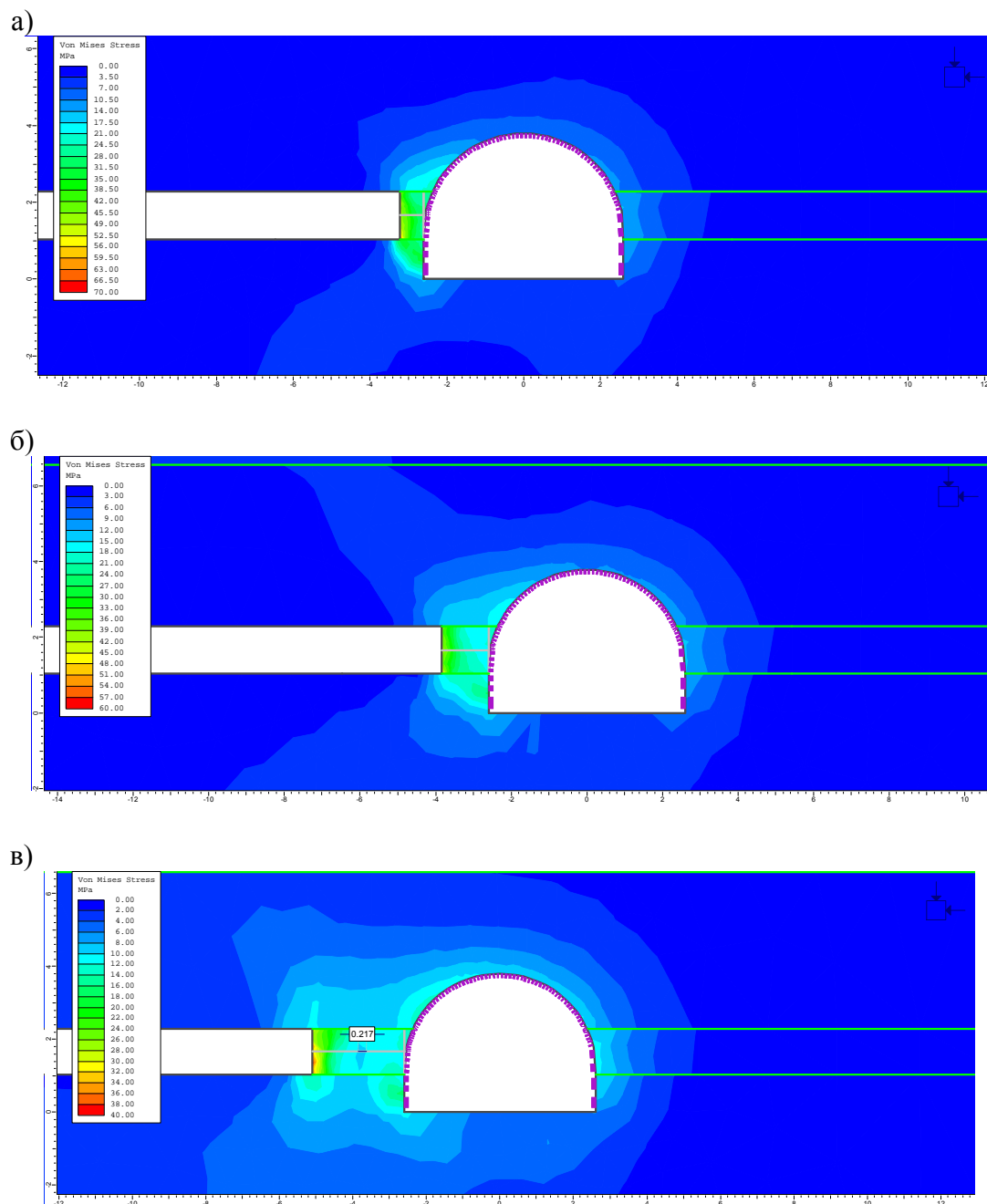


Рис. 6. Увеличение прочности целика по мере роста его ширины:

$$\text{а) } \frac{B}{m} = 0,5; \quad \text{б) } \frac{B}{m} = 1; \quad \text{в) } \frac{B}{m} = 2$$

Однако, влияние целика на устойчивость подготовительной выработки не ограничивается его прочностью. В значительной мере сохранность выработки зависит и от вертикальной податливости охранной конструкции, которая в рассматриваемых горно-геологических условиях должна обеспечивать смещения контура выработки (в особенности почвы), не превышающие 0,4 м. Это зависит от жесткости целика, которая определяется по формуле

$$G = \frac{\sigma_y B}{U_y} \quad (6)$$

Здесь  $\sigma_y$  и  $U_y$  - величина вертикальных напряжений и перемещений по верхней кромке целика,  $B$  - ширина целика.

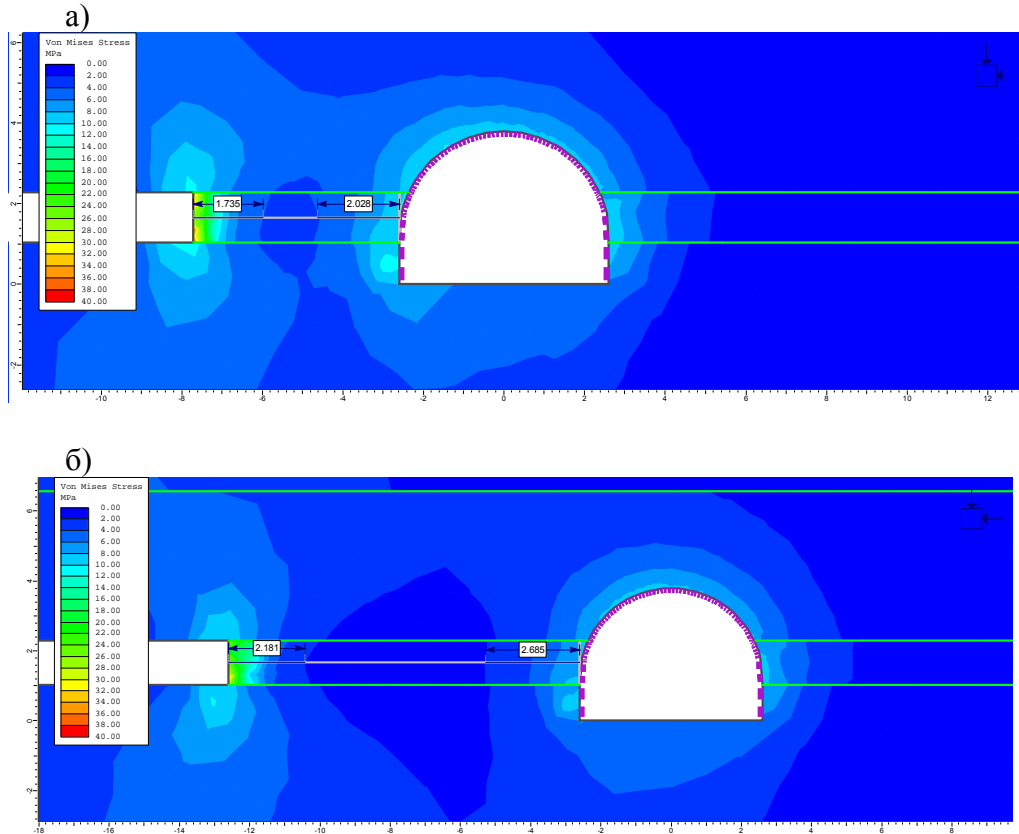


Рис. 7. Увеличение прочности целика по мере роста его ширины: а)  $\frac{B}{m} = 4$ ; б)  $\frac{B}{m} = 8$

Результаты расчетов, выполненные по формулам (2, 3), (5) и (6), представлены в табл. 2, 3 и на рис. 8, 9. Из них следует, что полоса из твердеющего материала Текхард в силу своей жесткости обеспечивает достаточный уровень поднятия пород почвы, который равен 0,4 м, только при ее ширине 2,5 м, а не 1,5 м, как это принято в проекте.

Таблица 2

Результаты расчетов влияния жесткости целика на величину пучения пород почвы в выработки

Угольный целик, м	10	5	4	3	2,5	
Смещения в почве, м	0,29	0,42	0,51	0,6	0,79	
Костер, м	3	2,5	2	1,4	1	0,5
Смещения в почве, м	0,3	0,33	0,35	0,39	0,48	0,5
Полоса Текхард	3	2	1,6	0,8		
Смещения в почве, м	0,41	0,43	0,49	0,71		

Принимая во внимание то, что в качестве критерия пригодности выработки для повторного ее использования принята величина перемещения контура, в т.ч. и почвы, равная 0,4 м, получим минимально допустимую ширину угольного целика, равную 5,0 м, для полосы из материала Текхард – 2,5 м, для полосы из шпал – 1,6 м. Тогда из рис. 8 следует,

что этим величинам ширины целиков соответствуют следующим значениям интегрального коэффициента запаса прочности: уголь –  $\bar{k}_\zeta = 7,0$ ; текхард –  $\bar{k}_\zeta = 3,2$ ; дерево –  $\bar{k}_\zeta = 2,0$ .

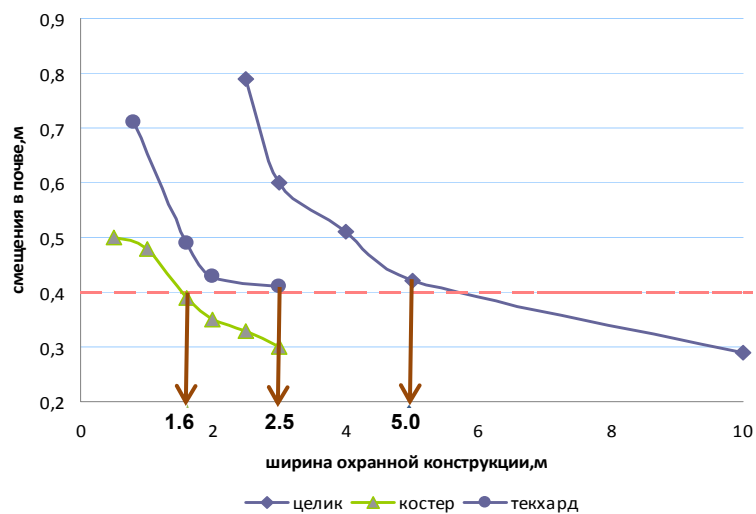


Рис. 8. Зависимость величины поднятия почвы в выработке от ширины и жесткости охранного элемента

Таблица 3

Результаты расчетов влияния ширины предохранительного целика на величину интегрального коэффициента запаса прочности

Ширина угольного целика	0,625	1,25	2,5	5	
Коэффициент запаса прочности	0,26	0,48	2,54	7,11	
Ширина костра	1	1,6	2	2,5	3
Коэффициент запаса прочности	0,55	1,86	2,56	3,28	4,64
Ширина полосы текхард, м	0,8	1,6	2	2,5	3
Коэффициент запаса прочности	2,044	3,21	4,51	5,53	6,41

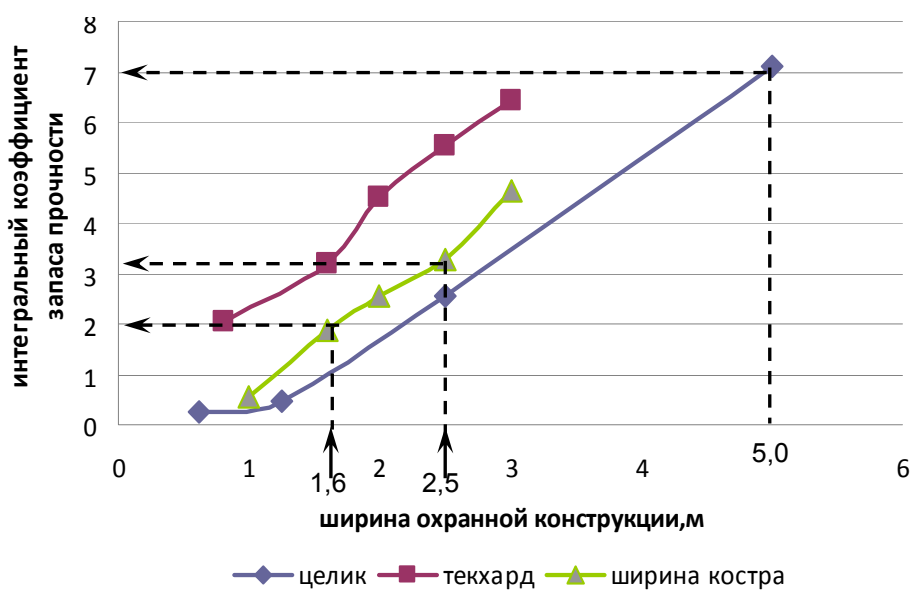


Рис. 9. Зависимость интегрального коэффициента запаса прочности от ширины целика

Во всех случаях рассматривалась проектная система комбинированной крепи: 6 сталеполимерных анкеров стандартной длины и 1 анкер канатный длиной 6 м.

### Выводы

1. В качестве критерия сохранности конвейерных штреков предлагается использовать величину смещений контура выработки, полученную, исходя из условий безопасной эксплуатации и выполнения необходимого объема работ по приведению ее в состояние, пригодное для повторного использования, которая в рассматриваемых горно-геологических условиях равна 0,4 м, что позволяет на этой основе осуществлять проектирование систем крепи и охранных элементов на сопряжении «штрек-лава».

2. Оценка прочности предохранительного целика при заданной его ширине и жесткости на сопряжении «лава-штрек» может быть выполнена по интегральному коэффициенту запаса прочности, исходя из условий обеспечения поднятия пород почвы на величину, не более 0,4 м. При этом величина интегрального коэффициента запаса прочности для охранных элементов из различного материала составляет: уголь –  $\bar{k}_c = 7,0$ ; текхард –  $\bar{k}_c = 3,2$ ; дерево –  $\bar{k}_c = 2,0$ .

3. Предельная величина смещений контура подготовительной выработки при паспортных параметрах анкерной системы (количество анкеров, углы их наклона, места установки) может быть обеспечена либо угольным целиком шириной 5 м, либо полосой из деревянных шпал шириной 1,4 м, либо полосой из твердеющего материала Текхард шириной 2,5 м. Выбор того или иного материала целика и его параметров определяется экономическим расчетом.

### Список литературы

1. Шашенко А.Н. Численное моделирование потери устойчивости пород почвы в горных выработках глубокого заложения / А.Н. Шашенко, К.В. Кравченко, А.Ю. Король // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гіричного виробництва – Науково-виробничий журнал: Кременчуцький національний університет ім. М. Острогорського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Випуск 9 (12). – С. 105-112.

2. Шашенко А.Н. Механика горных пород: учебн. [для студ. вищ. учеб. завед.] / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.

3. Шашенко Д.А. К оценке устойчивости предохранительных целиков методом конечных элементов / Е.А. Сдвижкова, Д.А. Шашенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск. – 2007. – Вип. 73. – С. 300 – 305.

4. Шашенко Д.А. Оценка устойчивости предохранительных целиков между тоннелями под Керченским проливом / Н.Д. Глухов, Д.А. Шашенко Д.А. // Науковий вісник Національного гіричного університету. – 2008. – № 11. – С. 11 – 14.

5. Шашенко Д.А. Влияние структуры горных пород на прочность ленточных целиков / Д.А. Шашенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. Вип. 78. – С. 109 – 112.

6. Шашенко Д.А. Расчет на прочность ленточных целиков / Д.А. Шашенко // Науковий вісник Національного гіричного університету. – 2009. – № 10. – С. 10 – 11.

7. Шашенко Д.А. Транспортная составляющая в экономике Украины / Д.А. Шашенко // Науковий вісник Національного гіричного університету. – 2009. – № 12. – С. 95 – 98.

8. Шашенко Д.А. Оценка запаса прочности ленточных предохранительных целиков / Е.А. Сдвижкова, Н.В. Хозяйкина, Д.А. Шашенко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009». – Д.: Національний гіричний університет. – 2009. – С 27 – 31.

9. Шашенко Д.А. Обоснование ширины предохранительных целиков при сооружении подземного транспортного перехода под Керченским проливом / Е.А. Сдвижкова, Н.В. Хозяйкина, Д.А. Шашенко // Gornictwo s geoinzynierie: Kwartalnik akademii Gorniczo-Hutniczej im Stanislawo Stuszcica w Krakowie. - Krakow. – 2010. Rok 34 zoszyt 2. – 3. 553-560.



10. Sdvyzhkova O. Shashenko D. Parameters of safety pillars between the tunnels under the Kerch Strat // Technischer Universitat Bergakademie Freiberg, Germany. Scientific Reports on resource Issues 2010. Volume 2. Mechanical characteristics of Rock. – P. 151-156.

11. Шашенко Д.А. Геомеханическое обоснование длительной устойчивости предохранительных целиков между транспортными тоннелями: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / Шашенко Дмитрий Александрович.– Днепропетровск, 2010.– 144 с.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

*С.Н. Ганеев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

Представлена методика и некоторые результаты численного моделирования процесса выдавливания пород из почвы выработки. Пучение рассматривается как возмущенный процесс при потере упругопластической устойчивости породного массива в ее окрестности. Показано развитие возмущенного процесса в массиве различной степени неоднородности.

**Введение.** Одним из наиболее частых и повсеместно распространенных видов проявлений горного давления в протяженных выработках угольных шахт Украины является пучение пород почвы, затраты на ликвидацию последствий которого значительны и приводят к повышению себестоимости угля.

Сложность природы явления, разнообразие горно-геологических факторов, в которых эксплуатируются выработки, привело к возникновению массы гипотез, объясняющих механизм пучения. Анализ результатов натурных измерений, выполненных различными исследователями, приводит к выводу, что в основе явления вспучивания, наблюдаемого в несхожих условиях, лежат некие общие закономерности. Это позволяет рассматривать пучение как явление потери упругопластической устойчивости геомеханической системы «выработка-породный массив» [1].

**Состояние вопроса.** Исследование явления упругопластической устойчивости аналитическими методами является достаточно сложной задачей, имеющей свое решение для сравнительно простых случаев. При этом такие решения сводятся к определению момента вспучивания и не рассматривают дальнейшее развитие процесса.

Снять многие математические ограничения в задачах геомеханики позволяют численные методы, такие, как метод конечных элементов (МКЭ). При этом корректность результатов расчетов может быть обеспечена применением математических моделей, отражающих закономерности реального исследуемого процесса.

**Целью настоящей статьи** является описание модели и методики моделирования процесса выдавливания пород почвы в горных выработках, а также освещение некоторых результатов моделирования для случаев с одиночной выработкой, расположенной в породном массиве с различной степенью неоднородности.

**Изложение основного материала.** В соответствии с принятой гипотезой природы пучения почвы, потеря устойчивости приконтурного массива протекает как совокупность двух процессов [2]:

а) невозмущенного процесса (до потери устойчивости) – деформирования приконтурного массива, протекающего по схеме запредельного деформирования породного образца при его испытании на прессах «жесткого» типа;

б) возмущенного процесса (после потери устойчивости) – развитие собственно выдавливания пород из почвы выработки.